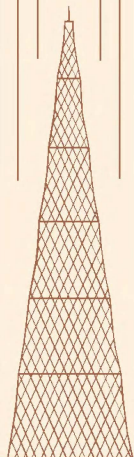
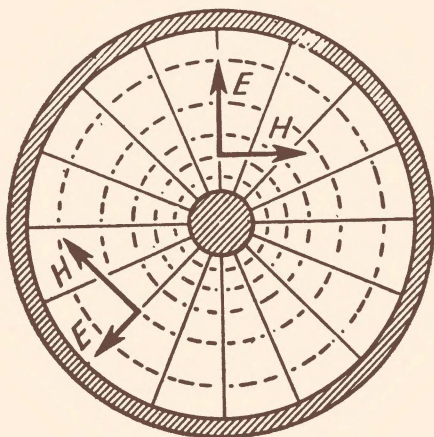


МАССОВАЯ
РАДИО
БИБЛИОТЕКА

С. Е. ЗАГИК и Л. М. КАПЧИНСКИЙ

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

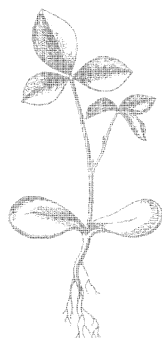
1 9 5 9

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 324

С. Е. ЗАГИК и Л. М. КАПЧИНСКИЙ

КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ



Scan AAW



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И.
Геништа К. Н., Джигит И. С., Канаева А. М., Кренкель Э. Т.,
Куликовский А. А., Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

В брошюре рассмотрены основные физические процессы в коаксиальных линиях, указаны области применения коаксиальных линий, описаны различные режимы их работы, приведены примеры использования коаксиальных кабелей в радиолюбительской практике. Описаны также наиболее распространенные конструкции гибких и жестких кабелей и приведены конструктивные данные и электрические параметры кабелей промышленного изготовления.

Брошюра предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Загик Семен Ефимович и Капчинский Лев Михайлович
КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ

Редактор В. Ю. Иванчицкий

Техн. редактор Г. И. Матвеев

Сдано в пр-во 25/XI 1958 г.

Подписано к печати 3/II 1959 г.

Бумага 84×108^{1/2}₈₂

2,05 п. л.

Уч.-изд. л. 2,9

T-01174

Тираж 30 000

Цена 1 р. 15 к.

Заказ № 1523

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Радиочастотные коаксиальные кабели находят широкое применение в промышленной, связной, телевизионной радиолокационной и другой радиотехнической аппаратуре. Они используются в качестве фидерных линий, линий дальней связи, трансформаторов сопротивлений, элементов полосовых и режекторных фильтров.

Гибкие коаксиальные кабели применяются также для устройства междублочных соединений и монтажа радиоаппаратуры. Жесткие коаксиальные линии используются в качестве колебательных контуров многих устройств метрового и дециметрового диапазонов волн.

Существует ряд типов коаксиальных кабелей специального назначения: кабели задержки с замедленной скоростью распространения электромагнитных волн, кабели трансформации с переменным по длине волновым сопротивлением, высокоомные кабели с малой погонной емкостью, применяемые в импульсных установках.

На частотах до нескольких десятков мегагерц наряду с экранированными линиями, примером которых является коаксиальный кабель, используются и неэкранированные линии, однако они обладают повышенными потерями и подвержены влиянию помех.

Диапазон частот, в котором используются экранированные линии, очень широк: от звуковых частот (сотни и тысячи герц) до сверхвысоких частот (несколько тысяч мегагерц). Основные достоинства таких линий — возможность передачи широкого спектра частот, относительно небольшое затухание, малые поперечные размеры, самоэкранирование и защищенность от внешних помех, надежность и экономичность — способствуют их широкому распространению. На частотах выше нескольких десятков мегагерц применяются в основном экранированные линии.

На частотах выше нескольких тысяч мегагерц экранированные линии, в том числе коаксиальные кабели, стано-

вятся уже малоэффективными, и приходится применять другие типы линий — волноводы, представляющие собой полые металлические трубы прямоугольного или круглого сечения. Дело в том, что на таких частотах сильно возрастают потери как в проводах экранированной линии, так и в диэлектрике, которым разделены ее внутренний и внешний провода. Другое обстоятельство, затрудняющее использование коаксиальных линий на коротковолновом участке диапазона сверхвысоких частот, заключается в невозможности передачи по такой линии большой мощности.

Мощность, которую можно передать по коаксиальной линии, ограничена значением напряжения между проводами линии, при котором наступает пробой. Пробивное напряжение может быть повышено, при сохранении заданного волнового сопротивления, пропорциональным увеличением диаметров внутреннего и внешнего проводов. При этом увеличивается толщина слоя изоляции между проводами, благодаря чему повышается величина пробивного напряжения. Но при использовании коаксиальной линии в диапазоне сверхвысоких частот диаметр внешнего провода ограничен. Он не может превышать определенной величины, так как при длине внутренней окружности этого провода, соизмеримой с длиной волны электромагнитных колебаний, в линии могут возникнуть паразитные типы волн, приводящие к искажениям сигнала и увеличению потерь.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ

При передаче по линии энергии электромагнитных колебаний высокой частоты около проводов линии возникает электромагнитное поле, представляющее собой совокупность переменных электрического и магнитного полей. Обе эти составляющие электромагнитного поля неразрывно связаны и не могут существовать раздельно, независимо одна от другой: переменное электрическое поле порождает магнитное, а переменное магнитное поле — электрическое.

Составляющие электромагнитного поля имеют в любой точке пространства около проводов линии определенную величину и направление и называются соответственно векторами электрического и магнитного полей. Графически векторы электрического и магнитного полей (E и H) изображают в виде стрелок, длина которых пропорциональна напряженности поля (электрического или магнитного).

На рис. 1 условно изображено электромагнитное поле в поперечном сечении простейшей двухпроводной линии передачи (открытая двухпроводная линия). В каждой точке поля вектор электрического (магнитного) поля направлен по касательной к силовой линии электрического (магнитного) поля. Силовые линии расположены гуще в той области пространства, где поле сильнее, и реже — где поле слабее.

Как видно из рис. 1, электрические и магнитные силовые линии расположены наиболее густо в пространстве между проводами. Это означает, что основная часть энергии электромагнитного поля сосредоточена именно здесь, вблизи проводов линии. По мере удаления от проводов электрическое и магнитное поля быстро ослабевают,

однако их можно обнаружить даже на сравнительно большом расстоянии от двухпроводной линии. Таким образом, четко выраженной границы, отделяющей электромагнитное поле двухпроводной линии от окружающего пространства, не существует. Это значит, что часть энергии, распространяющейся по линии, рассеивается в окружающем пространстве. Кроме того, такая открытая линия

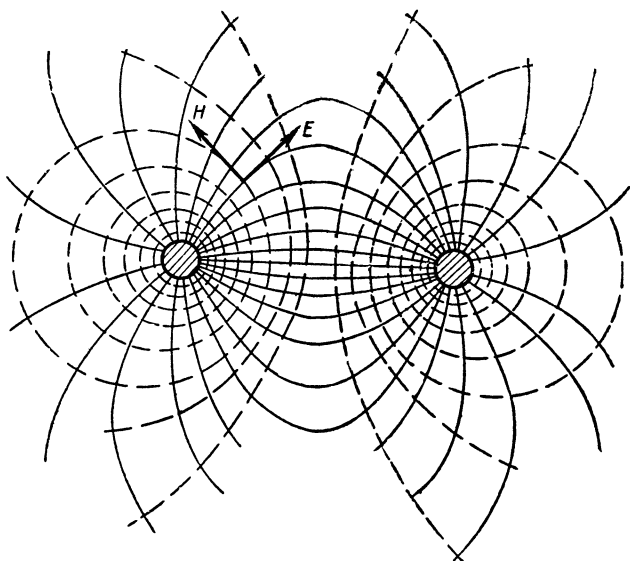


Рис. 1. Электрическое и магнитное поля в поперечном сечении двухпроводной симметричной линии.

—— электрические силовые линии;
 --- магнитные силовые линии.

является источником помех и сама воспринимает помехи от окружающих источников излучения.

Если окружить двухпроводную линию металлическим экраном, то электромагнитное поле линии будет существовать только в пространстве, заключенном внутри экрана. Излучения электромагнитной энергии в окружающее пространство в этом случае не будет.

В линии, окруженной экраном, можно вместо двух проводов оставить всего один, а в качестве второго провода называемого по аналогии с линиями постоянного тока «обратным», использовать экран. Линия, в которой «прямым» является внутренний провод, а «обратным»

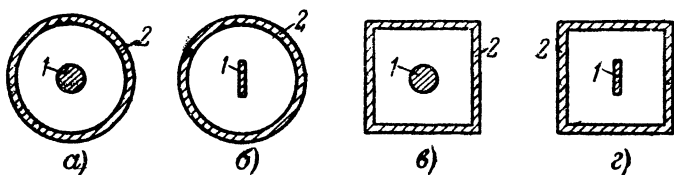


Рис. 2. Поперечные сечения несимметричных экранированных линий.

1 — центральный провод; 2 — экран (обратный провод).

проводом служит экран, в отличие от двухпроводной (симметричной) линии называется несимметричной.

Как экран, так и внутренний проводник несимметричной линии могут иметь различные формы поперечного сечения. На рис. 2 показаны примеры некоторых поперечных сечений несимметричных линий. В том случае, когда ось внутреннего проводника, имеющего вид цилиндра, и ось экрана совпадают, линию называют коаксиальной (рис. 2, а). Коаксиальные линии являются наиболее распространенным типом несимметричных экранированных линий.

Электромагнитное поле в поперечном сечении коаксиальной линии условно изображено на рис. 3. Электрические силовые линии направлены по радиусам. Магнитные силовые линии имеют вид concentric окружностей, охватывающих внутренний проводник. Векторы электрического и магнитного полей в каждой точке поперечного сечения линии взаимно-перпендикулярны.

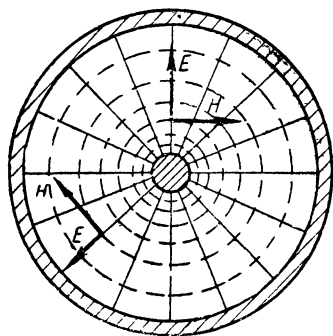


Рис. 3. Электрическое и магнитное поля в поперечном сечении коаксиальной линии.

— — — электрические силовые линии;
- - - магнитные силовые линии.

Если к линии приложено синусоидальное напряжение, то величины векторов электрического и магнитного полей меняются во времени по синусоидальному закону. Величины векторов E и H в разные моменты времени будут принимать различные значения — от нулевых до максимальных, называемых амплитудными. При переходе векторов E и H через нулевые значения их направление меняется на противоположное.

Величины и направления векторов электрического и магнитного полей в различных точках по длине линии, соответствующие какому-либо фиксированному моменту времени, показаны на рис. 4. Это изображение представляет собой как бы «моментальную фотографию» поля. Если эту «неподвижную» картину перемещать вправо со скоростью распространения волны, то полученная «движущаяся» картина будет иллюстрировать процесс распространения электромагнитной волны вдоль линии. Проследим последовательные фазы этого процесса.

Допустим, что в некоторый момент времени t_1 электрическое и магнитное поля распределены вдоль линии, как показано на рис. 4,а. Период колебания T , т. е. время, в течение которого синусоидальное напряжение, приложенное к линии, проходит полный цикл изменения, связан с частотой f синусоидального напряжения следующей зависимостью:

$$T = \frac{1}{f}.$$

Если с момента времени t_1 прошло время, равное четверти периода, то картина поля окажется сдвинутой вправо и приобретет вид, изображенный на рис. 4,б.

На рис. 4,в—д показаны соответственно картины поля вдоль линии через промежутки времени, равные половине, трем четвертям и полному периоду колебаний.

В момент времени, отличающийся от начального момента на полный период T , картина поля имеет точно такой же вид, как и в момент времени t_1 . Таким образом, картина распределения векторов электрического и магнитного полей вдоль линии периодически повторяется через промежутки времени, равные целому числу периодов колебаний.

Рис. 4 не только иллюстрирует процесс движения электромагнитной волны вдоль линии, но и позволяет проследить во времени характер изменения электромагнитного поля в любом поперечном сечении линии. В качестве примера рассмотрим поле в поперечном сечении коаксиальной линии, расположенном на расстоянии l от условно выбранного начала линии. В момент времени t_1 векторы поля в этом сечении достигают максимального (амплитудного) значения и имеют направления, которые будем условно считать положительными.

В течение первой четверти периода колебаний (начиная с момента времени t_1) векторы электрического и маг-

нитного поля уменьшаются по величине, сохраняя свое направление. Ровно через четверть периода оба вектора становятся равными нулю. В течение следующей четверти

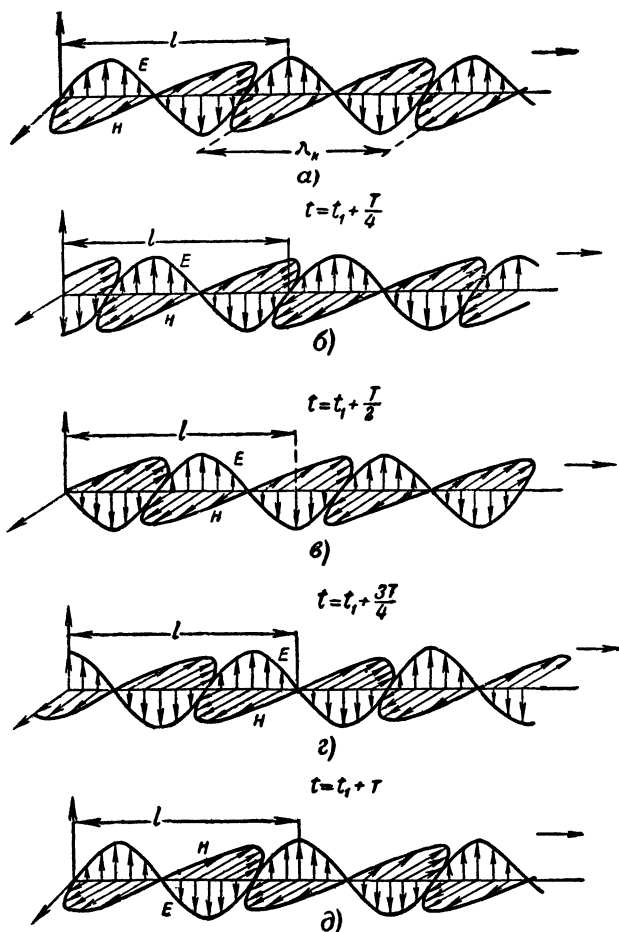


Рис. 4. Электрическое и магнитное поля вдоль линии передачи.

периода оба вектора увеличиваются, но имеют противоположное направление. Ровно через половину периода с момента времени t_1 векторы снова становятся максимальными. В течение второго полупериода колебаний векторы электрического и магнитного полей сначала уменьшаются, 2—1523

затем становятся равными нулю и к концу периода снова достигают максимального положительного значения.

Таким образом, через промежутки времени, равные периоду колебаний, характер электромагнитного поля как вдоль линии, так и в любом ее поперечном сечении повторяется.

Электромагнитная волна распространяется в коаксиальной линии со скоростью, которая определяется по формуле

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}},$$

где c — скорость света в воздухе, равная 300 000 км/сек;
 ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии.

За время, равное одному периоду колебаний, волна перемещается на расстояние, равное произведению скорости распространения волны v на период колебаний T . Это расстояние называется длиной волны в кабеле (см. рис. 4):

$$\lambda_k = vT.$$

Длина волны в кабеле связана с длиной волны в воздухе λ_g соотношением

$$\lambda_k = \frac{\lambda_g}{\sqrt{\epsilon}}.$$

Например, диэлектрическая проницаемость ϵ полиэтилена, применяемого обычно в качестве изоляции в высокочастотных коаксиальных кабелях, равна 2,3. Поэтому длина волны в кабелях со сплошной полиэтиленовой изоляцией короче длины волны в воздухе в $\sqrt{2,3} = 1,52$ раза. Это явление, которое нужно учитывать в ряде практических случаев, называется укорочением длины волны в кабеле, а величина $1/\sqrt{\epsilon}$ — коэффициентом укорочения.

2. ПАРАМЕТРЫ КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Основными параметрами кабеля являются волновое сопротивление Z_0 , постоянная затухания β и погонная емкость C_0 .

Волновое сопротивление Z_0 равно отношению напряженности электрического поля в любой точке поперечного сечения линии к напряженности магнитного поля в этой

же точке в случае, когда электромагнитная волна распространяется вдоль линии в одном направлении, не испытывая отражения (бегущая волна).

Напряжение между проводами линии пропорционально напряженности электрического поля E , а ток, текущий в линии, пропорционален напряженности магнитного поля H . Следовательно, волновое сопротивление можно определить как отношение напряжения к току в режиме бегущей волны в линии. Волновое сопротивление линии с потерями не является чисто активным, а имеет и реактивную составляющую. Обычно затухание в линиях невелико и волновое сопротивление на практике можно считать чисто активным.

Если линию на конце нагрузить на активное сопротивление R_n , численно равное волновому сопротивлению ($R_n = Z_0$), то вся энергия, доходящая до конца линии, будет поглощаться в этом сопротивлении и в линии установится режим бегущей волны.

Волновое сопротивление линии определяется только формой, размерами и взаимным расположением проводников в поперечном сечении линии.

Волновое сопротивление линии связано с погонной индуктивностью L_0 и погонной емкостью C_0 следующим соотношением:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Для коаксиального кабеля L_0 и C_0 определяются через геометрические размеры его поперечного сечения по следующим формулам:

$$L_0 = 0,46 \lg \frac{D}{d} = 0,2 \ln \frac{D}{d} \text{ мкГн/м;}$$

$$C_0 = \frac{\epsilon \cdot 10^{-3}}{41,5 \lg \frac{D}{d}} = \frac{\epsilon \cdot 10^{-3}}{18 \ln \frac{D}{d}} \text{ мкФ/м.}$$

Волновое же сопротивление коаксиального кабеля определяется геометрическими размерами его поперечного сечения по формуле

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon}} \lg \frac{D}{d} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \frac{D}{d} \text{ ом,}$$

где D — внутренний диаметр экрана;

d — диаметр центрального провода;

ϵ — диэлектрическая проницаемость изоляции.

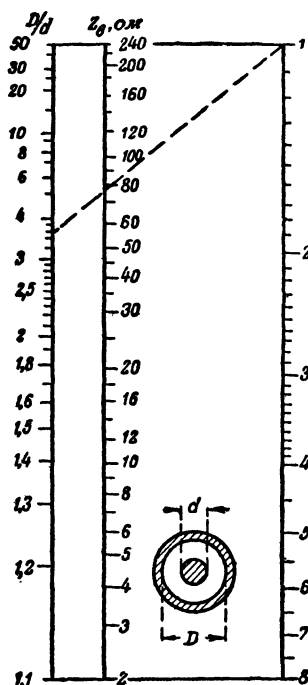


Рис. 5. Номограмма для определения волнового сопротивления коаксиальных кабелей.

Z_g — волновое сопротивление;
 D — внутренний диаметр экрана;
 d — наружный диаметр центрального проводника;
 ϵ — диэлектрическая проницаемость изоляции.

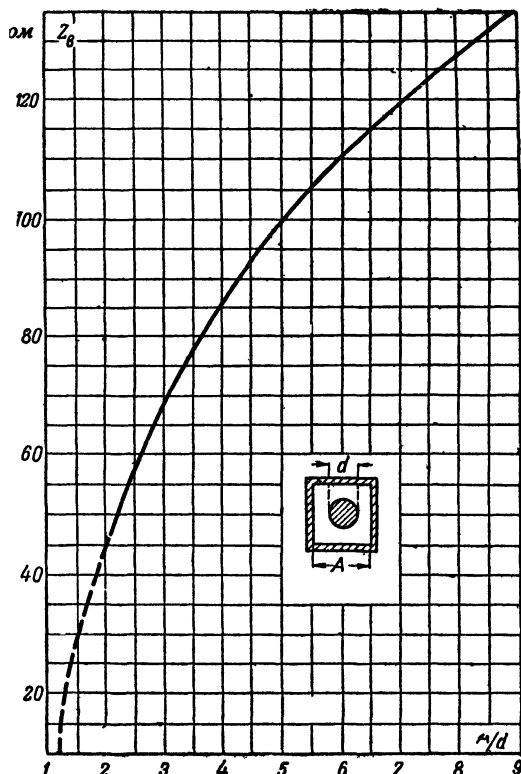


Рис. 6. График для определения волнового сопротивления линии с проводом круглого сечения в трубе квадратного поперечного сечения.

Для определения волнового сопротивления коаксиального кабеля удобно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 5. Для этого нужно соединить на номограмме прямой линией точки, соответствующие заданному отношению D/d и заданной величине ϵ . Точка пересечения этой прямой со средней линией номограммы определяет величину волнового сопротивления. С помощью этой же номограммы можно решить и обратную задачу, т. е. при заданной величине ϵ определить отношение D/d , необходимое для получения требуемой величины волнового сопротивления.

В некоторых устройствах иногда применяются несимметричные экранированные линии с квадратными или иными по форме поперечными сечениями. Волновые сопротивления несимметричных экранированных линий, отличающихся по форме поперечного сечения от коаксиальных, можно определить по кривым, приведенным на рис. 6 и 7.

Постоянная затухания β характеризует уменьшение мощности в линии, происходящее по мере распространения

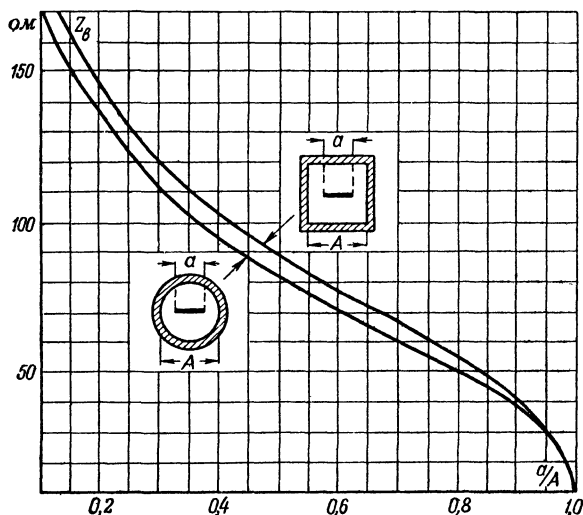


Рис. 7. График для определения волнового сопротивления линии с ленточным проводом в трубах круглого или квадратного поперечного сечения.

электромагнитных колебаний вдоль линии. Потери мощности вызываются рассеянием энергии на активном сопротивлении проводов и в диэлектрике линии.

Обычно в справочниках приводится постоянная затухания β в миллинеперах на метр (мнп/м) или в неперах на километр (неп/км). Для того чтобы определить полное затухание в кабеле, надо постоянную затухания умножить на общую длину кабеля. Например, постоянная затухания для кабеля РК-3 на частоте $f=100 \text{ МГц}$ равна 8 неп/км . При этом в кабеле длиной $l=100 \text{ м}$ ($0,1 \text{ км}$) полное затухание $\beta l=0,8 \text{ неп}$. Затухание часто выражают также в децибелах ($1 \text{ неп}=8,7 \text{ дБ}$).

Зная полное затухание в кабеле, можно вычислить, во сколько раз уменьшится мощность, дошедшая до конца линии, по сравнению с мощностью, поступающей на ее вход.

В случае, когда в линии имеет место режим бегущей волны (вся энергия, дошедшая до конца линии, поглощается в нагрузке, не отражаясь), мощность P_n , поступающая в нагрузку, мощность P_z , поступающая из генератора в линию, и полное затухание линии βl связаны соотношением

$$\beta l_{об} = 10 \lg \frac{P_z}{P_n} \text{ или } \beta l_{нел} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_z}{P_n}.$$

Напряжения в начале и конце линии в этом случае связаны с коэффициентом затухания следующим равенством:

$$\beta l_{об} = 20 \lg \frac{U_z}{U_n} \text{ или } \beta l_{нел} = \ln \frac{U_z}{U_n}.$$

Токи в начале и конце линии связаны такими же соотношениями.

Зная полное затухание линии βl , выраженное в децибелах или неперах, можно по этим формулам вычислить отношение мощностей или напряжений в начале и конце линии.

На рис. 8 приведена номограмма; с помощью которой можно по заданной величине βl определить отношения

$$P_z/P_n, U_z/U_n \text{ и } I_z/I_n$$

Как уже упоминалось, затухание в кабеле определяется потерями мощности на активном сопротивлении прямого и обратного проводов и потерями мощности в диэлектрике. Из всех известных диэлектриков наименьшими потерями обладает чистый сухой воздух. Потери в воздухе настолько малы, что, например, затухание в коаксиальной линии с воздушным диэлектриком на всех частотах практически определяется лишь потерями в ее проводах. Высокочастотные диэлектрики, применяемые для изоляции в гибких кабелях, например полиэтилен, также обладают малыми потерями, хотя и значительно большими, чем сухой воздух. На частотах примерно до 10 Мгц потери в проводах кабелей во много раз превышают потери в диэлектрике. Однако потери в диэлектрике растут пропорционально частоте

и при частоте в несколько сотен мегагерц могут превысить потери в проводах линии. По этой причине на частотах порядка 1 000 Мгц и выше часто используются так называемые жесткие коаксиальные линии с воздушным диэлектриком.

Затухание в проводах кабеля зависит от удельного сопротивления металла, из которого сделаны провода, размеров поперечного сечения проводов и частоты. Чем меньше удельное сопротивление проводов, тем меньше потери в них. С увеличением частоты затухание в проводах растет. Это объясняется так называемым эффектом вытеснения тока.

Плотность тока по сечению провода на высокой частоте неодинакова. У поверхности проводника плотность тока максимальна, а в более глубоких слоях она уменьша-

$\delta\delta$	P_2/P_n	$U_2/U_n, I_2/I_n$
0	1	1
1	1,26	1,12
2	1,59	1,26
3	2	1,41
4	2,5	1,59
5	3,16	1,78
6	4	2
7	5	2,2
8	6,3	2,5
9	7,95	2,82
10	10	3,16
11	11,26	3,55
12	15,9	4
13	20	4,47
14	25	5
15	31,6	5,62
16	40	6,31
17	50	7,08
18	63	7,94
19	80	8,91
20	100	10

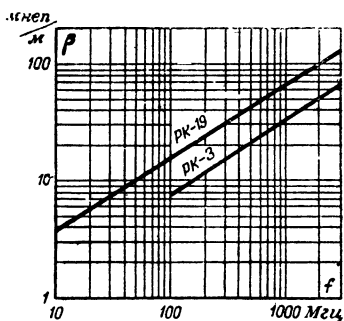


Рис. 9. Зависимость погонного затухания кабелей РК-3 и РК-19 от частоты.

Рис. 8. Номограмма для определения отношения мощностей, напряжений и токов в начале и конце линии ($P_2/P_n, U_2/U_n, I_2/I_n$) в режиме бегущей волны по полному затуханию линии βl в децибелах. P_2 — мощность, поступающая в линию; P_n — мощность в согласованной нагрузке; U_2 (I_2) — напряжение (ток) на входе линии; U_n (I_n) — напряжение (ток) на нагрузке.

ется. Таким образом, ток как бы вытесняется из глубины проводника на его поверхность.

Толщина слоя проводника, в котором сосредоточена основная часть тока, называется глубиной проникновения тока. В коаксиальной линии ток, текущий по экрану, вытесняется к его внутренней поверхности. Ток, текущий по внутреннему проводнику, вытесняется к внешней поверхности этого проводника. Чем выше частота, тем меньше глубина проникновения и, следовательно, эквивалентная площадь части проводника, по которой протекает ток. Это и приводит при увеличении частоты к увеличению сопротивления проводов и росту потерь в проводах линии.

На рис. 9 показан для примера характер зависимости постоянной затухания β кабелей РК-3 и РК-19 от частоты.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ДЛИННЫХ ЛИНИЙ

При передаче энергии в длинной линии могут существовать падающая и отраженная волны.

Падающей волной называют волну, распространяющуюся вдоль кабеля от источника энергии (генератора, приемной антенны) к нагрузке.

Отраженная волна возникает в кабеле, если последний нагружен на сопротивление, не равное его волновому сопротивлению. В этом случае в нагрузке на конце кабеля поглотится только часть энергии, дошедшей до нее. Остальная часть энергии отразится от нагрузки обратно в кабель. Отраженная волна распространяется от нагрузки к генератору, т. е. в направлении, противоположном направлению распространения падающей волны.

Амплитуда отраженной волны напряжения $U_{отр}$ (или тока $I_{отр}$) пропорциональна амплитуде падающей волны $U_{пад}$ (или $I_{пад}$):

$$U_{отр} = p_n U_{пад}; \quad I_{отр} = p_m I_{пад},$$

где p_n — коэффициент отражения по напряжению;

p_m — коэффициент отражения по току.

Режим бегущей волны. Если кабель нагружен на согласованную нагрузку (на активное сопротивление, равное его волновому сопротивлению), то коэффициенты отражения по напряжению и току равны нулю ($p_n = p_m = 0$). Отраженная волна в этом случае отсутствует (в линии имеется только падающая волна), и вся переда-

ваемая энергия будет поглощаться в согласованной нагрузке. Подобный режим работы линии называется режимом бегущей волны.

В режиме бегущей волны амплитудные значения тока и напряжения вдоль линии, не имеющей потерь, постоянны. Если кабель имеет потери, то амплитудные значения тока и напряжения постепенно уменьшаются в направлении от генератора к нагрузке.

Режим стоячей волны. У кабеля, замкнутого на конце накоротко, коэффициент отражения по напряжению $\rho_n = -1$. Если кабель разомкнут (холостой ход), то $\rho_n = +1$. И в первом, и во втором случаях амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей волны. Вся энергия падающей волны отражается при этом обратно в кабель. Напряжения падающей и отраженной волн в каждой из точек линии складываются. Так как фаза напряжения и тока меняется вдоль линии, то в точках, где падающая и отраженная волны напряжения или тока оказываются в фазе, суммарное значение напряжения или тока будет максимальным. В точках же, где падающая и отраженная волны напряжения (тока) оказываются в противофазе суммарная величина напряжения (тока) равна нулю. Точки линии, где напряжение (или ток) максимально, называют пучностями, а те точки, где оно минимально, — узлами напряжения (или тока). Узел напряжения (тока) отстоит в кабеле от пучности напряжения (тока) на четверть длины волны. Расстояние между соседними пучностями, так же как и между узлами, равно половине длины волны.

Описанный режим работы кабеля называют режимом стоячей волны. Стоячая волна будет существовать в линии также в случаях, когда последняя нагружена на чисто реактивное (емкостное или индуктивное) сопротивление.

Распределение амплитудных значений напряжения и тока в режиме стоячей волны показано на рис. 10, а для случая короткого замыкания на конце кабеля и на рис. 10, б для случая холостого хода. Как видно из рис. 10, в случае короткого замыкания ток на конце кабеля максимален, а напряжение равно нулю; на расстоянии четверти длины волны от конца кабеля ток равен нулю, а напряжение максимально. В случае же холостого хода напряжение на конце кабеля максимально, а ток равен нулю; на расстоянии четверти длины волны от конца кабеля ток максимален, а напряжение равно нулю.

Режим работы кабеля при несогласованной нагрузке. Если нагрузка не согласована с кабелем и сопротивление нагрузки имеет активную составляющую, то амплитуда отраженной волны будет меньше, чем падающей, так как часть энергии поглотится в нагрузке. Амплитуды напряжения и тока в этом случае меняются вдоль линии, принимая максимальные и мини-

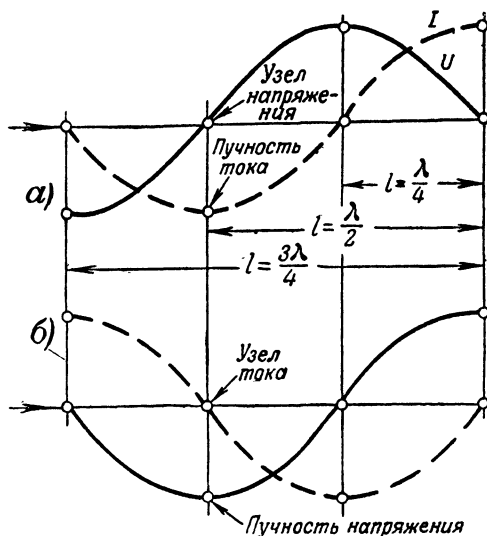


Рис. 10. Распределение токов и напряжений в кабеле.

- а — кабель на конце замкнут накоротко;
 б — кабель на конце разомкнут.
 — — — стоячая волна напряжения;
 - - - - - стоячая волна тока.

мальные значения, отстоящие друг от друга, как и в режиме стоячей волны, на четверть длины волны.

В отличие от режима стоячей волны напряжение в узлах в этом случае не равно нулю. Распределение напряжения вдоль линии показано на рис. 11.

Степень согласования нагрузки с линией характеризуется коэффициентом бегущей волны (КБВ):

$$КБВ = \frac{U_{мин}}{U_{макс}},$$

где $U_{мин}$ — амплитуда напряжения в узле;

$U_{макс}$ — амплитуда напряжения в пучности.

Величина, обратная коэффициенту бегущей волны, называется коэффициентом стоячей волны (KCB):

$$KCB = \frac{1}{KBB} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}.$$

Коэффициент бегущей волны связан с коэффициентом отражения следующим соотношением:

$$KBB = \frac{1-p}{1+p},$$

где p — численная величина коэффициента отражения (по напряжению или току).

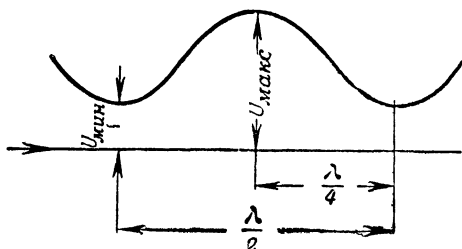


Рис. 11. Распределение напряжения в линии при несогласованной нагрузке.

В режиме бегущей волны ($p=0$) $KBB=1$, а в режиме стоячей волны ($p=1$) $KBB=0$.

Потери энергии в кабеле зависят от режима его работы; они минимальны при $KBB=1$ и увеличиваются при уменьшении KBB .

Зависимость величины потерь в линии от коэффициента бегущей волны при различных значениях полного затухания линии βl показана на рис. 12.

Если к выходу генератора высокой частоты подключить кабель, то входное сопротивление кабеля, на которое будет нагружен генератор, зависит в общем случае от длины кабеля, его волнового сопротивления и сопротивления нагрузки.

Входное сопротивление согласованного с нагрузкой кабеля ($KBB=1$) не зависит от длины кабеля и равно его волновому сопротивлению. Если кабель не согласован с нагрузкой ($KBB<1$), то входное сопротивление его имеет активную и реактивную составляющие, за исключением

случаев, когда на входе кабеля находится узел или пучность напряжения. Входное сопротивление кабеля, имеющего на входе пучность напряжения, по своему характеру чисто активно и равно волновому сопротивлению, деленному на $K_{БВ}$. Если на входе кабеля находится узел напряжения, то входное сопротивление кабеля также чисто активно и равно его волновому сопротивлению, умноженному на $K_{БВ}$.

При $K_{БВ}=0$ (кабель разомкнут, замкнут накоротко, нагружен на конденсатор или катушку индуктивности)

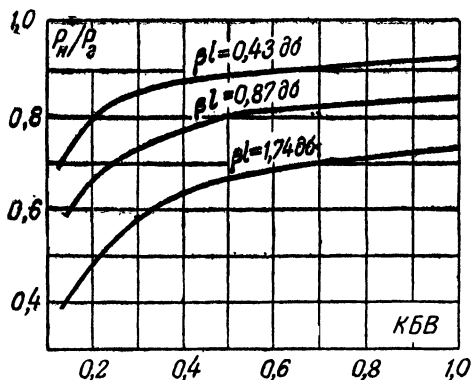


Рис. 12. Зависимость потерь в линии от коэффициента бегущей волны.

P_n — мощность, отдаваемая в нагрузку; P_z — мощность, отдаваемая генератором в линию.

входное сопротивление кабеля имеет либо чисто индуктивный, либо чисто емкостный характер. В частных случаях, когда на входе имеется узел или пучность напряжения, входное сопротивление кабеля равно соответственно либо нулю, либо бесконечности.

На рис. 13 показана зависимость входного сопротивления кабеля, замкнутого на конце накоротко, а также разомкнутого, от его длины. Как видно из рисунка, входное сопротивление кабеля, замкнутого накоротко, при длине $l < \lambda_c/4$ имеет индуктивный характер, а при длине $l > \lambda_c/4$ — емкостный.

Входное сопротивление кабеля, замкнутого накоротко при длине $l = \lambda_c/4$, равно бесконечности, если кабель не имеет потерь, и очень велико, в случае кабеля с потерями.

ми. Входное сопротивление разомкнутого кабеля при $l < \lambda_k/4$ имеет емкостный характер, при $l > \lambda_k/4$ — индуктивный, а при $l = \lambda_k/4$ равно нулю. Распределение токов и напряжений вдоль линии для каждого из разобранных случаев показано на рис. 10. Входное сопротивление кабеля длиной $l = \lambda_k/2$ всегда равно сопротивлению нагрузки, независимо от ее величины.

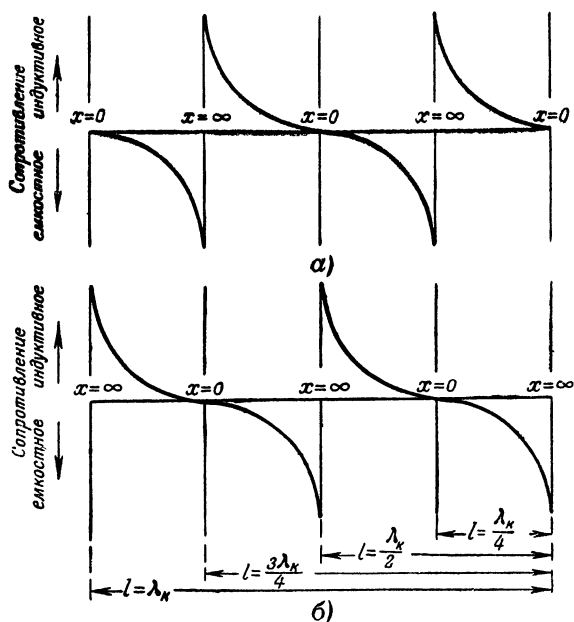


Рис. 13. Зависимость входного сопротивления кабеля без потерь от его длины.

а — кабель на конце замкнут накоротко; б — кабель на конце разомкнут.

В случае, когда кабель длиной в четверть волны нагружен на чисто активное сопротивление, его входное сопротивление определяется выражением

$$R_{sx} = \frac{Z_s^2}{R_n},$$

где Z_s — волновое сопротивление кабеля;

R_n — сопротивление нагрузки.

КОНСТРУКЦИИ КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

4. ГИБКИЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ КАБЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Основными элементами конструкции гибкого коаксиального кабеля являются внутренний провод, внешний провод, изоляция и защитная оболочка (рис. 14).

Внутренний провод, как уже указывалось, выполняется из металла, имеющего высокую удельную про-

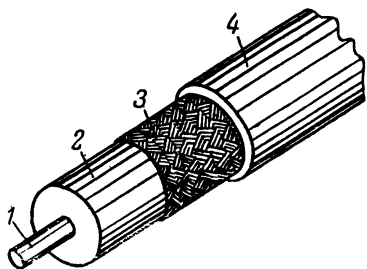


Рис. 14. Конструкция гибкого коаксиального кабеля.

1 — внутренний провод; 2 — изоляция;
3 — внешний провод; 4 — защитная оболочка.

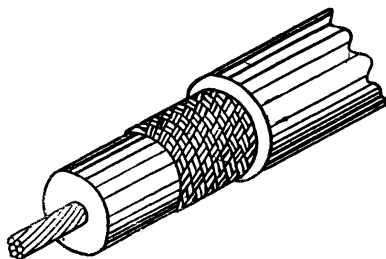


Рис. 15. Коаксиальный кабель с
многожильным внутренним про-
водом.

водимость (малое сопротивление), чаще всего из электролитической меди. Внутренний провод гибкого кабеля либо выполняется сплошным (рис. 14), либо свивается из нескольких проводников (рис. 15).

Витой провод применяется в тех кабелях, которые по условиям эксплуатации должны иметь повышенную гибкость. При той же площади поперечного сечения витой провод по сравнению со сплошным имеет большее сопротивление на единицу длины. Следовательно, при прочих равных условиях кабель с проводом, свитым из нескольких проводников, будет иметь большие потери, чем кабель со сплошным проводом, сечение которого равно суммарному сечению этих проводников. По этой причине у кабелей, которые должны иметь возможно меньшие потери, внутренний провод выполняется сплошным.

У кабеля, который должен обладать повышенной прочностью на растяжение, внутренний провод выполняется из

стали, покрытой слоем электролитической меди. Такой биметаллический провод имеет для токов высокой частоты почти то же удельное сопротивление, что и сплошной медный. Это объясняется тем, что толщина хорошо проводящего медного покрытия превышает глубину проникновения тока в провод.

Очень важно, чтобы поверхность как медного, так и биметаллического проводов была чистой и хорошо обработанной. Загрязнение поверхности провода или окалина вызывают дополнительные потери в кабеле. Кроме того, загрязнение и шероховатость поверхности внутреннего провода могут уменьшить электрическую прочность кабеля.

Изоляция. Как элемент механической конструкции кабеля изоляция должна обеспечить совпадение осей внутреннего и внешнего проводов и предохранить внутренний провод от смещения при воздействии на кабель механических усилий, например при изгибах. Смещение внутреннего провода относительно оси кабеля (эксцентриситет) вызывает изменение волнового сопротивления, в результате чего в кабеле могут появляться отраженные волны. Кроме того, эксцентриситет снижает электрическую прочность кабеля.

Диэлектрик, из которого выполняется изоляция, должен иметь возможно меньшие потери, достаточную механическую и электрическую прочность. Кроме того, он должен обладать устойчивыми механическими и электрическими характеристиками, сохраняющимися при резких изменениях температуры.

В настоящее время изоляция почти у всех типов высокочастотных гибких кабелей выполняется из полиэтилена, который в основном удовлетворяет этим требованиям. Диэлектрическая проницаемость его $\epsilon = 2,3$.

У большинства кабелей изоляция выполняется сплошной, как показано на рис. 14 и 15. Такая изоляция обладает высокой механической прочностью.

Волновое сопротивление кабеля со сплошной полиэтиленовой изоляцией в 1,52 раза ($\sqrt{\epsilon}$) меньше, чем волновое сопротивление кабеля с воздушным диэлектриком, имеющего то же отношение диаметров внешнего и внутреннего проводов. Потери в кабеле со сплошной полиэтиленовой изоляцией больше, чем в кабеле с воздушным диэлектриком при одинаковых наружном диаметре и волновом сопротивлении.

В качестве примеров кабелей со сплошным диэлектриком можно привести такие широко распространенные кабели, как РК-1, РК-3, РК-6.

В тех случаях, когда кабель должен иметь высокое волновое сопротивление, применяется комбинированная воздушно-пластмассовая изоляция. В этом случае в изоляционном материале имеются продольные воздушные каналы (рис. 16,а), либо внутренний провод делается профилированным — со специальными изгибами (рис. 16,б).

Так как воздушно-пластмассовая изоляция имеет воздушные включения, то результирующая диэлектрическая проницаемость изоляции такого кабеля меньше, чем кабеля со сплошной изоляцией. Следовательно, кабель с воздушно-пластмассовой изоляцией при одинаковых поперечных сечениях проводов имеет меньшую погонную емкость и большее волновое сопротивление. Примером кабеля с комбинированной воздушно-пластмассовой изоляцией является кабель РК-50. Изоляция кабеля РК-50 выполнена в виде поллой трубки из полиэтилена. Волновое сопротивление этого кабеля равно 150 ом.

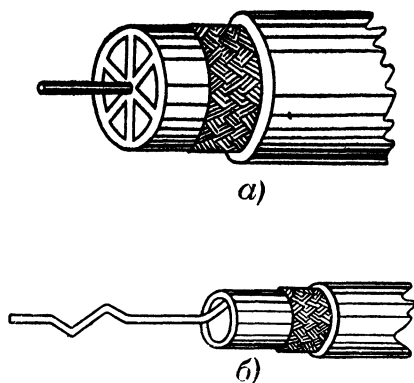


Рис. 16. Кабели с воздушно-пластмассовой изоляцией.

Воздушно-пластмассовая изоляция по сравнению со сплошной обладает меньшей механической прочностью. Кроме того, кабель с такой изоляцией сложен в изготовлении. Волновое сопротивление кабелей с изоляцией в виде поллой трубки может измениться в результате вытягивания профилированного внутреннего провода. Поэтому разделку концов кабелей с профилированным проводом нужно производить очень осторожно. Концы такого кабеля при монтаже необходимо тщательно герметизировать во избежание попадания влаги внутрь кабеля, что может вызвать окисление поверхности внутреннего провода и привести к увеличению потерь или даже разрушению провода. Нужно отметить, что потери в кабелях с комбинированной

изоляция меньше, чем в кабелях со сплошной изоляцией.

В высокочастотных кабелях иногда делают изоляцию в виде прессованных колпачков из полистирола или высокочастотной керамики, которые нанизываются на внутренний провод.

Поверх колпачков наматывается стирофлексовая лента, по которой скользят колпачки при изгибах кабеля. Примером кабеля с колпачковой изоляцией является кабель ТЗ-75, имеющий волновое сопротивление 75 ом.

Внешний провод гибкого коаксиального кабеля чаще всего выполняется из тонких медных проволочек в виде цилиндрической оплетки (рис. 14 и 15). Оплетка эта по сравнению со сплошной медной трубкой имеет большее удельное сопротивление и хуже экранирует кабель. Поэтому при прочих равных условиях кабель с внешним проводом в виде оплетки имеет большие потери, чем кабель, в котором внешним проводом служит сплошная трубка.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить очень высокую степень экранировки кабеля, внешний провод гибкого коаксиального кабеля выполняется в виде двойной оплетки.

Защитная оболочка служит для защиты кабеля от атмосферных воздействий и механических повреждений. Если кабель по условиям эксплуатации не подвержен значительным механическим воздействиям, то его защитная оболочка выполняется из хлорвинилового пластиката, нанесенного поверх оплетки. Примерами кабелей с защитной оболочкой из хлорвинилового пластиката служат кабели марок РК-1, РК-3, РК-50 и др.

У некоторых типов кабелей для защиты от механических воздействий используется броня из стальных лент или проволок, накладываемых поверх кабеля. Кабели, предназначенные для прокладки в земле, как, например, кабели дальней связи, покрываются поверх брони волокнистым материалом, пропитанным специальными составами, предохраняющими волокнистый материал от гниения.

5. ЖЕСТКИЕ КОАКСИАЛЬНЫЕ ЛИНИИ

Жесткие коаксиальные линии с воздушной изоляцией имеют значительно меньшие потери и большую механическую жесткость и прочность по сравнению с гибкими кабелями. Объясняется это тем, что внешний проводник жесткой линии выполняется из сплошной трубки, и поэто-

му его погонное сопротивление меньше, чем у оплетки из медных проволок. Кроме того, внешний и внутренний провода жесткой линии разделены воздухом, диэлектрические потери в котором много меньше, чем даже у хороших высокочастотных диэлектриков, например полиэтилена.

Жесткие коаксиальные линии применяются главным образом в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн, на которых гибкие кабели имеют большие потери. В диапазоне метровых волн жесткие коаксиальные линии применяются реже и главным образом в случаях, когда линия передачи имеет большую длину (порядка сотен метров), а потери должны быть минимальными. Применяются они также тогда, когда по линии надо пропустить большую мощность (десятки киловатт).. Жесткий коак-

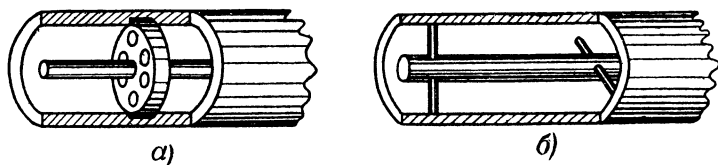


Рис. 17. Жесткая коаксиальная линия.

а — с изоляцией в виде шайб; *б* — с изоляцией в виде стержней.

сиальный кабель применяется, например, в качестве фидера, соединяющего передающую антенну телевизионного центра с передатчиком. На дециметровых, а иногда и метровых волнах, короткозамкнутые жесткие коаксиальные линии используются в качестве элементов резонансных систем (фильтры, контуры высокочастотных генераторов и т. п.).

Жесткие коаксиальные линии изготавливаются обычно из латунных труб. Внутренний проводник делают также из латунного стержня. Как правило, токонесущие поверхности жесткой коаксиальной линии — внутреннюю поверхность внешнего проводника и наружную поверхность внутреннего проводника — серебруют. Линия с серебряным покрытием имеет меньшие потери, чем линия, не покрытая серебром, так как удельное сопротивление серебра ниже удельного сопротивления латуни.

Внутренний проводник жесткой коаксиальной линии укрепляется либо при помощи шайб из высококачественного диэлектрического материала с малыми потерями (рис. 17,*а*), например, полистирола, либо при помощи изо-

лирующих стержней (рис. 17,б). Диэлектрическая проницаемость материала, из которого выполняются шайбы, всегда больше, чем диэлектрическая проницаемость воздуха. По этой причине в местах установки шайб, если не приняты специальные меры, волновое сопротивление линии будет меньше, чем в остальной ее части. Следовательно, в линии могут иметь место скачки волнового сопротивления. Такой скачок вызывает частичные отражения электромагнитных волн, что нарушает нормальную работу линии. Это явление заметно сказывается на волнах, длина которых соизмерима с расстоянием между шайбами.

Чтобы уменьшить отражения, шайбы выполняются с отверстиями (рис. 18,а) или же им придается специаль-

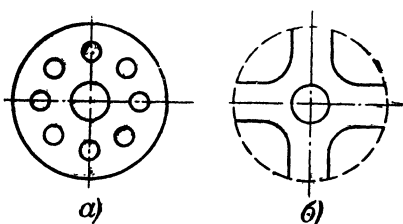


Рис. 18. Виды опорных шайб.

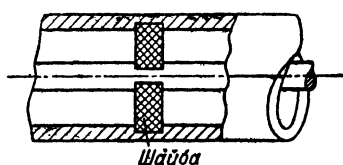


Рис. 19. Крепление центрального провода с помощью врезной шайбы.

ная форма (рис. 18,б). В местах установки таких шайб не все поперечное сечение линии заполнено диэлектриком, и скачок волнового сопротивления будет меньше, чем при сплошной шайбе. Чаще всего для уменьшения скачка волнового сопротивления применяют так называемые «врезные шайбы» (рис. 19). В местах установки таких шайб радиус внешней поверхности внутреннего проводника и радиус внутренней поверхности внешнего проводника отличны от соответствующих радиусов в остальной линии и выбираются они так, чтобы скомпенсировать влияние диэлектрика шайбы на волновое сопротивление линии.

Толщина шайбы выбирается по соображениям механической прочности обычно в пределах 3—4 мм. На дециметровых и, тем более, метровых волнах толщина такой шайбы и расстояние между шайбами намного меньше, чем длина волны, и описанные способы уменьшения отражений оказываются достаточно эффективными.

На сантиметровых волнах участок линии, занимаемый одной шайбой, соизмерим с длиной волны, и влияние шайб на волновое сопротивление, а следовательно, и на

режим работы линии оказывается весьма заметным. По этой причине в линиях, предназначенных для передачи сантиметровых волн, вместо диэлектрических шайб часто применяют так называемые «металлические изоляторы». Простейший металлический изолятор, показанный на рис. 20, представляет собой короткозамкнутую жесткую коаксиальную линию, длина которой равна четверти длины рабочей волны.

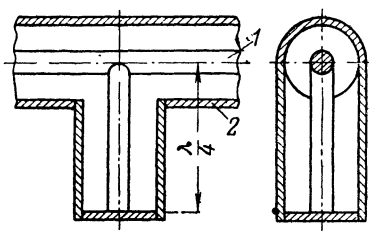


Рис. 20. Четвертьволновый металлический изолятор.

1 — внутренний провод; 2 — экран.

Центральный стержень этой короткозамкнутой линии служит опорой для внутреннего проводника основной линии. Входное сопротивление короткозамкнутой линии намного превышает волновое сопротивление основной линии, и потому короткозамкнутая линия не шунтирует основную линию. На частотах, на которых длина металлического изолятора от-

личается от четверти длины волны, изолятор шунтирует линию, что приводит к появлению отраженных волн. Поэтому полоса частот, которую можно передать по линии с металлическими изоляторами, невелика.

Для расширения рабочей полосы пропускаемых по линии частот применяются более сложные конструкции металлических изоляторов, основой которых также служат четвертьволновые линии, замкнутые на конце.

Глава третья

ПРИМЕНЕНИЕ КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

Как уже указывалось, коаксиальные кабели находят широкое применение в радиотехнической аппаратуре. Во многих случаях такая аппаратура носит узко профессиональный характер; поэтому мы остановимся здесь на рассмотрении лишь тех наиболее часто встречающихся случаев, с которыми приходится сталкиваться радиолюбителю в его практической деятельности.

В качестве фидеров приемных телевизионных антенн чаще всего применяются коаксиальные кабели типов РК-1 и РК-3 с волновым сопротивлением 75 ом. Кабель РК-3 по

своим электрическим параметрам лучше, чем РК-1, и применять его несколько выгоднее, так как потери в нем меньше. Однако это различие практически начинает замечаться только в том случае, если фидер имеет большую длину (100—150 м).

При установке приемной телевизионной антенны необходимо следить за тем, чтобы кабель, используемый в качестве фидера, не терся о выступающие острые части здания, например край кровли крыши. Если кабель имеет большую длину, то его нужно закрепить в нескольких местах или же подвесить на стальном тросе; в противном случае кабель будет вытягиваться под действием собственного веса, что может привести к его порче.

Короткие отрезки коаксиальных кабелей часто применяют для согласования сопротивлений. Как уже говорилось, если к коаксиальной линии подключено активное сопротивление, не равное волновому сопротивлению кабеля, то кабель будет рассогласован с нагрузкой. Для получения в кабеле режима бегущей волны нужно между выходом этой линии и нагрузкой включить согласующий трансформатор, представляющий собой четвертьволновую линию из кабеля с другим волновым сопротивлением. Волновое сопротивление четвертьволновой трансформирующей линии подсчитывается по формуле.

$$Z_{тр} = \sqrt{R_n Z},$$

где R_n — сопротивление нагрузки;

Z — волновое сопротивление основного кабеля.

Длина четвертьволнового трансформатора из кабеля вычисляется по формуле

$$l_{тр} = \frac{\lambda_{ср}}{4\sqrt{\epsilon}},$$

где $\lambda_{ср}$ — средняя длина волны в рабочей полосе частот.

Пример. Допустим, что в телевизионной антенне коллективного пользования в качестве снижения используется коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 ом, к которому подключены два согласованных со своими нагрузками магистральных кабеля с волновыми сопротивлениями по 75 ом (рис. 21).

В этом случае снижение антенны оказывается нагруженным на общее сопротивление, равное $75/2 = 37,5$ ом, и, следовательно, кабель снижения не будет согласован с нагрузкой (рис. 21, а).

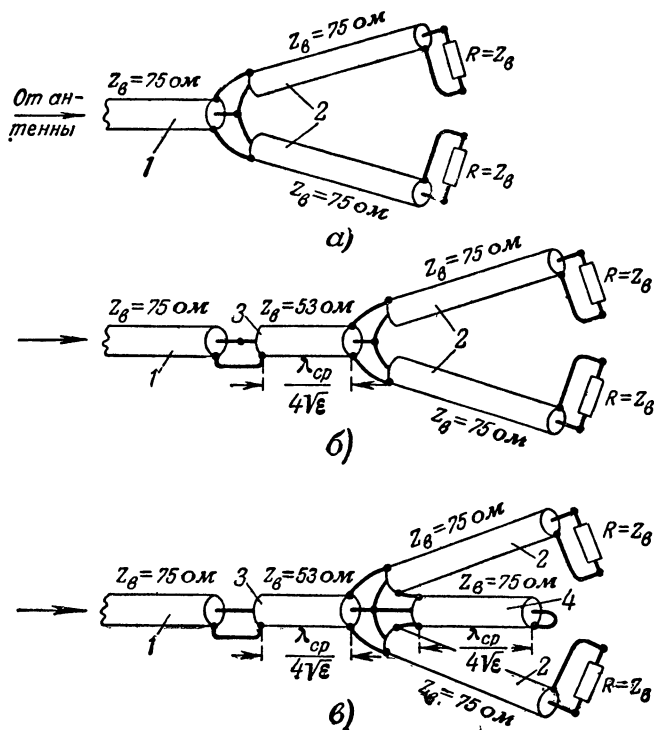


Рис. 21. Способы включения четвертьволнового трансформатора в распределительную сеть коллективной антенны.

а — включение без трансформатора (кабель снижения рассогласован); *б* — включение двух магистральных фидеров с согласующим трансформатором; *в* — включение двух магистральных фидеров с согласующим трансформатором и шлейфом.

1 — кабель снижения; 2 — магистральные фидеры; 3 — трансформатор; 4 — шлейф.

Для получения в снижении режима бегущей волны нужно между концом снижения и точкой разветвления магистральных кабелей включить согласующий четвертьволновый трансформатор (рис. 21, б).

Волновое сопротивление трансформирующего отрезка кабеля

$$Z_{тр} = \sqrt{R_n Z} = \sqrt{37,5 \cdot 75} = 53 \text{ ом.}$$

Такое волновое сопротивление имеет кабель типа РК-6. Длина отрезка кабеля при средней длине волны $\lambda_{ср} = 4,23 \text{ м}$ ($f = 48,5 \div 100 \text{ Мгц}$) равна:

$$l_{тр} = \frac{\lambda_{ср}}{4\sqrt{\epsilon}} = \frac{4,23}{6,08} = 0,7 \text{ м.}$$

Согласующие четвертьволновые трансформаторы часто применяются в сложных многоэтажных антеннах, а также в других случаях, когда необходимо трансформировать активное сопротивление нагрузки.

Может случиться, что среди имеющихся гибких кабелей нет кабеля с нужным волновым сопротивлением. В этом случае требуемое волновое сопротивление иногда можно получить, включив параллельно несколько кабелей. Так, например, два параллельно включенных кабеля РК-6 образуют линию с волновым сопротивлением $52/2 = 26 \text{ ом}$.

Если, используя гибкие кабели, не удастся подобрать нужное волновое сопротивление, то можно изготовить жесткий трансформирующий кабель, подобрав по требуемой величине волнового сопротивления размеры внутреннего и наружного проводов (см. рис. 5—7). При расчете длины жесткого воздушного кабеля нужно считать $\varepsilon = 1$. Жесткие трансформирующие кабели применяют также в случаях, когда пересчет сопротивления нужно произвести очень точно.

Рабочая полоса частот четвертьволнового трансформатора тем шире, чем меньше различаются сопротивления на входе и выходе трансформатора. Если, например, сопротивление нагрузки отличается от волнового сопротивления согласуемого кабеля в 2 раза, то относительная полоса пропускания трансформатора $2\Delta f/f_{cp}$ на уровне коэффициента бегущей волны (КБВ) в кабеле, равного 0,7, составляет 0,6.

Для расширения рабочей полосы частот трансформатора можно включить дополнительно отрезок кабеля длиной в четверть волны, закороченный на конце, как показано на рис. 21, в.

Если волновое сопротивление больше сопротивления нагрузки, то этот кабель (называемый обычно шлейфом) подключается параллельно нагрузке; при волновом сопротивлении, меньшем сопротивления нагрузки, шлейф подключается параллельно основному кабелю на входе трансформатора. Относительная полоса пропускания трансформатора со шлейфом на уровне $КБВ = 0,7$ при различии согласуемых сопротивлений в 2 раза составляет 0,9.

Шлейф можно изготовить из кабеля того же типа, что и трансформатор. Геометрическая длина шлейфа равна четверти длины волны в кабеле.

Из короткозамкнутых или разомкнутых коаксиальных кабелей можно изготовить фильтры для смешения сигналов различных частот, режекторные и полосовые фильтры, а также фильтры верхних и нижних частот.

Фильтры смешения представляют собой устройства, с помощью которых ко входу телевизионного приемника можно подключить две телевизионные антенны разных каналов. Эти фильтры состоят из короткозамкнутых или разомкнутых отрезков кабелей¹.

Существуют две основные группы фильтров, составленных из коаксиальных кабелей. К первой группе относятся фильтры, выполненные из кабелей, длина которых значительно меньше $\lambda_k/4$. Такие отрезки кабелей можно рассматривать как сосредоточенные индуктивности или емкости. Ко второй группе относятся фильтры, выполненные из резонансных отрезков кабелей, длина которых равна $\lambda_k/2$ или $\lambda_k/4$.

Фильтры первой группы применяются в основном в качестве фильтров верхних и нижних частот. Они состоят из коротких отрезков кабелей и сосредоточенных емкостей (конденсаторов). Такие фильтры аналогичны фильтрам верхних и нижних частот, выполненным из катушек индуктивности и конденсаторов.

Схема одного звена фильтра нижних частот показана на рис. 22,а. Фильтр состоит из двух коротких отрезков кабелей и конденсатора. Волновое сопротивление в омах каждого из кабелей вычисляется по формуле

$$Z_{\theta} = R_{\kappa} \sqrt{1 + \frac{300}{2\pi f_{cp} l_{\kappa} \sqrt{\epsilon}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi f_{cp} l_{\kappa} \sqrt{\epsilon}}{300} \right)}.$$

Емкость конденсатора в пикофарадах вычисляется по формуле

$$C = \frac{\operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi f_{cp} l_{\kappa} \sqrt{\epsilon}}{300} \right)}{Z_{\theta} \pi f_{cp}} \cdot 10^6,$$

где R_{κ} — сопротивление на выходе фильтра, ом;

f_{cp} — частота среза, МГц;

l_{κ} — длина каждого отрезка кабеля, м.

При заданной величине сопротивления нагрузки одна и та же частота среза может быть получена при различ-

¹ Описание некоторых фильтров приведено в брошюре С. Е. Загика и Л. М. Капчинского „Приемные телевизионные антенны“ (Госэнергоиздат, „Массовая радиобиблиотека“, 1958).

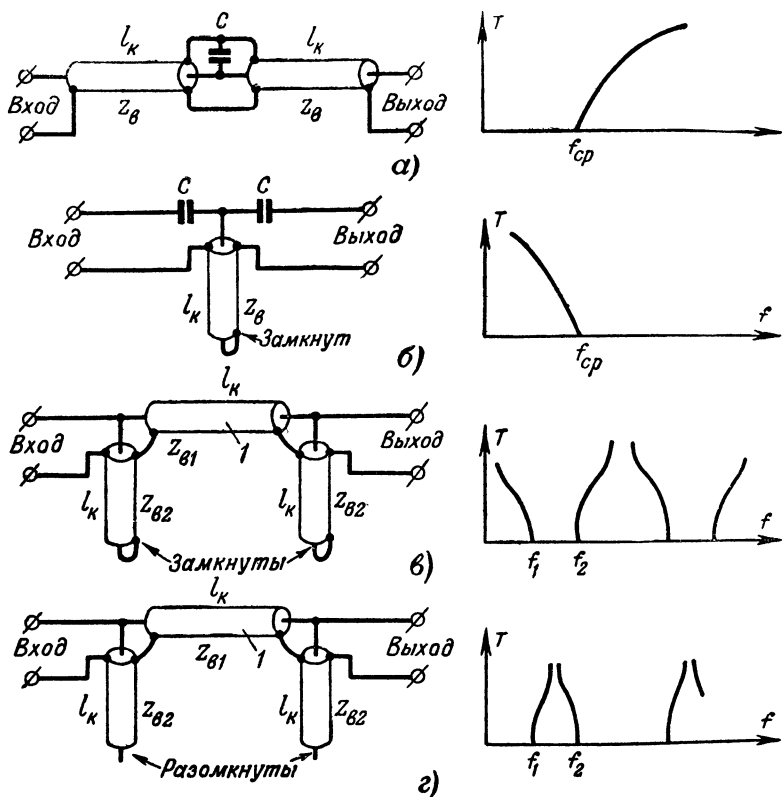


Рис. 22. Фильтры на коаксиальных кабелях и их характеристики затухания.

а — фильтр нижних частот; б — фильтр верхних частот; в — полосовой фильтр; г — режекторный фильтр.

ных сочетаниях волнового сопротивления кабелей и их длины. Геометрическая длина l_K каждого из отрезков кабелей не должна превышать $1/8 \lambda_K$, где λ_K — длина волны в кабеле, соответствующая частоте среза.

При использовании таких фильтров нужно учитывать, что в полосе запираания на частотах $f = f_{cp} \frac{mn}{4}$ могут появляться дополнительные узкие полосы пропускания (здесь $m = 1, 2, 3, \dots$, а $n = \frac{\lambda_K}{l_K}$).

Характеристика затухания фильтра показана на рис. 22, а.

Из нескольких простейших фильтров может быть собран многозвенный фильтр с большей крутизной характеристики затухания. Сопряжение отдельных звеньев многозвенного фильтра нужно производить непосредственно, без промежуточных кабелей. Если же возникает необходимость разнести отдельные звенья фильтра, то соединять их нужно кабелем, волновое сопротивление которого равно сопротивлению нагрузки последнего звена.

Схема звена фильтра верхних частот и характеристика его затухания показаны на рис. 22, б. Этот фильтр состоит из двух конденсаторов и короткого отрезка кабеля. Величина волнового сопротивления этого кабеля (в омах) и емкость конденсатора (в пикофарадах) определяются по формулам:

$$Z_{\epsilon} = 300 \frac{R_{\kappa}}{4\pi l_{\kappa} f_{cp} \sqrt{\epsilon}} ;$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_{cp} R_{\kappa}}$$

Здесь, как и прежде, R_{κ} — сопротивление нагрузки, ом; f_{cp} — частота среза, Мгц и l_{κ} — длина кабеля, м.

Геометрическая длина l_{κ} выбирается обычно меньшей, чем $\frac{1}{12} \lambda_{\kappa}$. В полосе пропускания фильтра на частотах $f = f_{cp} \frac{mn}{2}$, где n и m те же, что и для фильтра нижних частот, имеют место дополнительные узкие полосы высокого затухания.

Из отдельных ячеек можно подобно фильтру нижних частот собрать многозвенный фильтр верхних частот.

Полосовой фильтр и его частотная характеристика показаны на рис. 22, в. Он относится к фильтрам второй группы, которые, как ранее указывалось, выполняются из полуволновых и четвертьволновых кабельных линий.

Расчет такого фильтра производится по следующим формулам:

$$Z_{\epsilon 1} = R_{\kappa} ;$$

$$Z_{\epsilon 2} = \frac{R_{\kappa} \cos \frac{\pi f_1}{f_1 + f_2}}{1 - \cos \frac{\pi f_1}{f_1 + f_2}} ;$$

$$l_{\kappa} = \frac{\lambda_{\kappa}}{4} ,$$

где $Z_{\epsilon 1}$ — волновое сопротивление кабеля 1;

$Z_{\epsilon 2}$ — волновое сопротивление короткозамкнутых шлейфов;

R_n — сопротивление нагрузки фильтра;

λ_k — длина волны в кабеле, соответствующая средней частоте полосы пропускания $\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right)$;

f_1 и f_2 — граничные частоты полосы пропускания.

На частотах, значительно превышающих верхнюю граничную частоту f_2 полосы пропускания, имеют место побочные полосы пропускания на частотах, при которых в отрезках кабелей фильтра укладывается нечетное число четвертей волны.

Если в этом фильтре вместо короткозамкнутых шлейфов применить разомкнутые на конце отрезки кабелей той же длины, то фильтр обращается в режекторный (рис. 22,з). Такой фильтр запирает сигнал частоты f , при которой длина отрезков кабелей фильтра будет равна четверти длины волны, так как четвертьволновой отрезок кабеля, разомкнутый на конце, имеет очень низкое входное сопротивление. В диапазоне дециметровых и сантиметровых волн в таких фильтрах используются жесткие коаксиальные линии.

В заключение остановимся кратко на особенностях применения коаксиальных кабелей для междублочных соединений в радиоаппаратуре. При соединении отдельных блоков аппаратуры коаксиальными кабелями могут встретиться два случая: 1) длина соединительного кабеля соизмерима с длиной волны; 2) длина соединительного кабеля значительно короче длины волны.

В первом случае необходимо иметь в виду, что несогласованный кабель является трансформатором сопротивлений. Входное сопротивление такого кабеля, составляющее нагрузку для предыдущего блока, может меняться в широких пределах в зависимости от длины кабеля. Поэтому нужно либо согласовывать соединительный кабель, либо подбирать его длину так, чтобы получить на его входе нужное сопротивление.

Если соединительный кабель значительно короче длины волны и сопротивление его нагрузки велико, то следует применять кабель с малой погонной емкостью.

В качестве примера рассмотрим случай соединения выхода видеосилителя телевизионного приемника с вы-

несенной электронно-лучевой трубкой. Входное сопротивление трубки, даже на самой высокой частоте спектра видеосигнала (5—6 Мгц), очень велико и имеет емкостный характер. При такой нагрузке короткий соединительный кабель будет эквивалентен цилиндрическому конденсатору, подключенному к выходу видеоусилителя. Таким образом, выход видеоусилителя будет шунтироваться емкостью кабеля, что может привести к завалу частотной характеристики видеоусилителя на верхних частотах. В этих случаях целесообразно применять кабель с малой погонной емкостью, например РК-50.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Погонное затухание некоторых типов радиочастотных коаксиальных и двухпроводных (симметричных) кабелей на различных частотах

Кабель	Погонное затухание, <i>дБ/км</i>				
	10 Мгц	100 Мгц	300 Мгц	1 000 Мгц	3 000 Мгц

Коаксиальные кабели

РК-29	3,5	13	23	46	100
РК-43	2,0	8	15	—	—
РК-6	1,9	6	14	31	67
РК-19	6,5	23	37	69	130
РК-28	2,5	10	17	—	—
РК-47	2,5	10	17	38	78
РК-49	4	15	26	53	103
РК-3	2,0	8	15	30	60
РК-4	2,0	8	15	30	60
РК-20	2,5	10	17	38	78
РК-1	3,5	13	23	46	100
РК-2	2,5	10	17	38	78

Двухпроводные кабели

РД-13	5	20	33	64	123
РД-17	2	8	15	30	60
РД-18	5	20	33	64	123
РД-14	2	8	15	30	60
РД-15	2,5	10	17	38	78
РД-16	2,5	10	17	38	78
РД-26	2,5	10	17	38	78

2. Конструктивные и электрические характеристики основных типов радиочастотных кабелей

Марка кабеля	Внутренний проводник		Изоляция		Тип внешнего проводника или экрана	Защитная оболочка		Волновое сопротивление, Ом	Погодная емкость (не более), пф/м	Затухание, неп/км		Испытательное напряжение (при частоте 50 гц), кВ	Средняя пропускная мощность (при частоте 100 Мгц), вт
	Конструкция	Диаметр, мм	Диаметр по изоляции, мм	Тип изоляции		Тип	Наружный диаметр или размер, мм			Частота, Мгц	Максимальное допустимое значение		

50-омные коаксиальные кабели

РК-19	1×0,68	0,68	2,4±0,1	И-1	МО	01	4,2±0,3	51	105	45	18	3	140
РК-63	7×0,23	0,69	2,0±0,125	И-1	ЛМО	05	3,3±0,3	46	125	—	—	3	120
РК-55	1×0,81	0,81	2,95±0,15	И-4	ЛМО	01	4,75±0,4	53	105	45	12	5	190
РК-59	1×0,81	0,81	2,95±0,15	И-4	ЛМД	05	5,1±0,4	53	105	45	12	5	190
РК-29	1×1,37	1,37	4,8±0,2	И-1	МД	01	9,8±0,6	50	105	45	9,5	4	420
РК-47	7×0,71	2,13	7,3±0,3	И-1	МО	01	10,3±0,6	52	101	45	7,5	3	650
РК-28	7×0,71	2,13	7,3±0,3	И-1	МД	01	11,1±0,7	52	101	45	7,5	4	650
РК-6	7×0,85	2,55	9,2±0,5	И-1	МО	01	12,4±0,8	52	101	45	6,0	10	800
РК-48	7×1,03	3,09	10,5±0,5	И-1	МО	01	13,5±0,8	50	105	45	6,0	17	1 000
РК-61	7×1,51	4,53	14,9±0,75	И-1	МО	01	18,7±1,1	50	101	45	4,5	18	1 500
РКВ	1×3,0+12×1,0	5,0±0,3	18,0±2,0	И-1	МО	01	25,0±3,0	53	105	10	1,5	25	1 700
РКП-2/200	19×1,3	6,5±0,5	22,0±2,0	И-1	МО	05*	31,0±2,0	50	105	100	3,5	15	2 300
ТКМ-50	1×5,0	5,0±0,15	18,0±1,5	И-1	МП	02	23,0±2,0	50	—	100	4,0	—	1 700

60-омные коаксиальные кабели

РКГ-5	1×3,0	3,0±0,3	13,25±1,25	И-1	МО	01	22±2	60	—	15	2,5	10	1 300
РКС-5	1×3,0	3,0±0,3	13,25±1,25	И-1	МП	02	22±2	60	—	15	1,6	10	1 500
РКГ-10	19×1,0	5,0±0,5	22,5±1,5	И-1	МО	01	29±3	60	—	15	1,6	15	2 100
РКС-10	1×5,0	5,0±0,5	22,5±1,5	И-1	МП	02	29±3	60	—	15	1,2	15	2 500
РКГ-15	19×1,6	8,0±0,5	35±2	И-1	МО	01	42±4	60	—	15	1,4	20	3 600

Марка кабеля	Внутренний проводник		Изоляция		Тип внешнего проводника или экрана	Защитная оболочка		Волновое сопротивление, Ом	Погодная емкость (не более), пг/м	Затухание неп/км		Испытательное напряжение (при частоте 50 гц), кВ	Средняя пропускательная мощность (при частоте 100 Мгц), Вт
	Конструкция	Диаметр, мм	Диаметр по изоляции, мм	Тип изоляции		Тип	Наружный диаметр или размер, мм			Частота, Мгц	Максимально допустимое значение		
РКС-15	19×1,6	8,0±0,5	35±2	И-1	МП	02	42±4	60	—	15	1,0	20	4 000
РКПГ-10	49×0,56	5,0±0,3	20,5±1,5	И-1	ЛМО	03	28±2	57	—	15	2,3	15	—
РКПГ-12	49×0,72	6,5±0,5	25,5±1,5	И-1	ЛМО	04	29±2	60	—	15	1,9	15	—

75-омные коаксиальные кабели

РК-1	1×0,68	0,68	4,6±0,2	И-1	МО	01	7,3±0,4	77	68	45	9,5	7	275
РК-49	7×0,26	0,78	4,2±0,2	И-1	МО	01	6,8±0,4	70	76	45	10,0	3	315
РК-20	7×0,37	1,11	7,2±0,3	И-1	МО	01	10,4±0,6	77	68	45	7,0	3	550
РК-3	1×1,37	1,37	9,0±0,4	И-1	МО	01	13,0±0,8	74	70	45	5,5	12	850
РК-4	1×1,37	1,37	9,0±0,4	И-1	—	02	11,0±0,7	74	70	45	8,0	12	850
РК-60	19×0,41	2,05	13,1±0,8	И-1	МО	01	16,9±2,0	75	68	45	5,0	8,0	1 250
РК-62	1×2,24	2,24	14,9±0,75	И-1	МО	01	18,7±1,1	75	68	45	4,0	7,5	1 500
РК-8	1×2,73	2,73	18,0±0,9	И-1	МО	01	21,0±1,0	75	68	60	3,0	18	2 000
ТКМ-75	1×3,0	3,0	20±1,5	И-1	МП	02	25±2	75	—	100	4,0	—	—

90-омные коаксиальные кабели

РК-2	1×0,68	0,68	68±0,3	И-1	МО	01	9,6±0,6	92	57	45	6,5	10	450
------	--------	------	--------	-----	----	----	---------	----	----	----	-----	----	-----

Кабели с воздушно-пластмассовой изоляцией

РК-50	1×0,3	0,30	6,2±0,3	И-3	МО	01	8,8±0,5	150	27	45	8,5	—	—
РК-56	1×0,64м	0,64	3,7±0,2	И-3	ЛМД	05	6,1±0,3	—	48	45	10,0	3,0	—

Марка кабеля	Внутренний проводник		Изоляция		Тип внешнего проводника или экрана	Защитная оболочка		Волновое сопротивление, Ом	Погонная емкость (не более), пф/м	Затухание, кеп/км		Испытательное напряжение (при частоте 50 гц), кВ	Средняя пропускная мощность (при частоте 100 Мгц), кВт
	Конструкция	Диаметр, мм	Диаметр по изоляции, мм	Тип изоляции		Тип	Наружный диаметр или размер, мм			Частота, Мгц	Максимально допустимое значение		
РК-ТЗ-150 РК-64	$1 \times 0,71$ $1 \times 1,03$	0,71 1,03	$13,5 \pm 1,5$ $7,3 \pm 0,3$	И-3 И-3	МО МО	04* 05	$19,7 \pm 2,0$ $10,3 \pm 0,6$	145 95	30 50	7,0 10 000	1,8 22	2,0 1,0	— —
Симметричные кабели со скрученными проводниками													
РД-13 РД-17	$1 \times 0,79$ $7 \times 0,79$	0,79 2,37	$1,8 \pm 0,1$ $6,3 \pm 0,3$	И-1 И-1	МД МО	01 01	$7,3 \pm 0,4$ $16,6 \pm 1,0$	86 100	55 53	45 45	14,0 6,0	3 10	— —
Симметричные кабели без экрана													
РД-14 РД-18	$7 \times 0,79$ $1 \times 0,79$	2,37 0,79	$6,3 \pm 0,3$ $1,8 \pm 0,1$	И-1 И-1	— —	01 01	$15,8 \pm 1,0$ $6,6 \pm 0,4$	— —	— —	— —	— —	10 4	— —
Двухжаксальные симметричные кабели													
РД-15 РД-16 РД-26	$7 \times 0,37$ $1 \times 0,68$ $1 \times 0,68$	1,11 0,68 0,68	$7,01 \pm 0,3$ $6,8 \pm 0,3$ $6,7 \pm 0,3$	И-1 И-1 И-1	МИО МИО МИ	01 01 02	$11,0 \pm 0,7 \times$ $\times 18,8 \pm 1,1$ $10,8 \pm 0,7 \times$ $\times 18,4 \pm 1,1$ $9,9 \pm 0,6 \times$ $\times 17,4 \pm 1,0$	147 192 92	36 28 28	45 45 45	7,0 6,5 6,5	10 10 7	— — —

Условные обозначения: И-1 — изоляция из кабельного полиэтилена; И-3 — изоляция воздушно-пластмассовая; И-4 — изоляция из стабилизированного полиэтилена; МО — оплетка медной проволокой; МД — двойная оплетка медной проволокой; МП — медные плоские проволоки и ленты; ЛМО — оплетка из луженой медной проволоки; ЛМД — двойная оплетка из луженых медных проволок; МИО — индивидуальная оплетка из медной проволоки каждой жилы и общая оплетка поверх обеих жил; МИ — индивидуальная оплетка медной проволоки каждой жилы; 01 — оболочка из полихлорвинилового пластика; 02 — оболочка из свинца; 03 — оболочка из резины; 04 — оболочка из хлопчатобумажной пряжи; 05 — оболочка из пигментированного полиэтилена.

* Поверх оболочки — обмотка из тканевой ленты и оплетка из стальных оцинкованных проволок диаметром 0,3 мм.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
--------------------	---

Глава первая

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ

1. Электромагнитное поле в коаксиальном кабеле	5
2. Параметры коаксиальных кабелей	10
3. Режимы работы длинных линий	16

Глава вторая

КОНСТРУКЦИИ КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

4. Гибкие коаксиальные кабели промышленного изготовления	22
5. Жесткие коаксиальные линии	25

Глава третья

Применение коаксиальных кабелей	28
Приложения	36

Цена 1 р. 15 к.